

УДК 621.314.212

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-86-93

Оценка ресурса изоляционной системы маслонаполненного оборудования с помощью распределения Парето

В.А. Чернышев, Е.В. Зенова

Величина ресурса времени как параметра обоснования целесообразности дальнейшей эксплуатации установленного оборудования является эффективным технико-экономическим показателем, значение которого непосредственно определяется состоянием изоляционной системы, интенсивностью эксплуатационных нагрузок и условиями окружающей среды. Существует много различных методов определения величины ресурса времени, но сложность, многообразие и неоднозначность процессов старения, многопараметричность при отсутствии прямых методов контроля затрудняют их использование в практике технического обслуживания эксплуатируемого оборудования.

Предпринята попытка формализовать процессы старения, даже если они носят спорадический и нерегулярный характер, с помощью распределения Парето. Эффективность оценок величины ресурса времени обеспечивается в этом случае тем, что параметры распределения Парето являются параметрами диэлектрической системы, определяющими ее состояние.

Ключевые слова: распределение Парето, ресурс времени эксплуатации, маслонаполненное оборудование, изоляционная система.

Для цитирования: Чернышев В.А., Зенова Е.В. Оценка ресурса изоляционной системы маслонаполненного оборудования с помощью распределения Парето // Вестник МЭИ. 2018. № 3. С. 86—93. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-86-93.

Estimating the Oil-filled Equipment Insulation System Residual Life Using the Pareto Distribution

V.A. Chernyshev, E.V. Zenova

The residual lifetime as a parameter for assessing the feasibility of further operation of installed equipment is an effective technical and economic indicator, the value of which is directly determined by the state of the equipment insulation system, the intensity of operational loads, and environmental conditions. There are many different methods for determining the residual lifetime; however, the complexity, variety, and ambiguity of ageing processes, and a multiparametric nature of the problem with the lack of direct monitoring techniques are factors that complicate the use of these methods in performing the maintenance of equipment in operation.

An attempt to formalize the ageing processes — even though they are sporadic and irregular in nature — by means of the Pareto distribution is taken. The effectiveness of the lifetime estimates is supported in this case due to the fact that the Pareto distribution parameters are the dielectric system parameters determining its condition.

Key words: Pareto distribution, operation lifetime, oil-filled equipment, insulation system.

For citation: Chernyshev V.A., Zenova E.V. Estimating the Oil-filled Equipment Insulation System Residual Life Using the Pareto Distribution. MPEI Vestnik. 2018;3:86—93. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-86-93.

Введение

Оценка состояния основного оборудования распределительных сетей, обеспечение заявленного ресурса времени эксплуатации при заданном уровне надежности по-прежнему остаются ключевыми моментами управления временем жизни установленного оборудования (управления процессом обслуживания).

Учитывая, что надежность работы энергетического оборудования (в первую очередь силовых трансформаторов) непосредственно связана с его сроком службы, а срок службы определяется непосредственно состоянием изоляционной системы, то величина оставшегося ресурса времени эксплуатации оборудования приобретает смысл важного технико-экономического параметра [1]. Значимость ресурса, как параметра контроля, заключается не только в том, что дает представление

об уровне структурного совершенства изоляционной конструкции работающего оборудования, но и определяет уровень экономической целесообразности дальнейшей эксплуатации установленного электротехнического устройства. Ключевым здесь с точки зрения методологии является переход от единичных оценок состояния системы в заданные моменты времени к понятию «lifetime» — времени жизни, являющемуся обобщенной характеристикой (комплексным показателем) технико-экономического состояния контролируемого электротехнического оборудования. Часто оказывается, что эксплуатация давно установленного оборудования экономически более оправдано, нежели его замена новым, но оценить стоимость установки нового оборудования намного легче, чем доказать эффективность эксплуатации установленного. В этом случае единственным технико-экономическим обоснованием

служит значение ресурса времени дальнейшей эксплуатации действующего оборудования. По своей физической природе ресурс изоляционной конструкции трансформатора является функцией состояния диэлектрической системы, интенсивности эксплуатационных нагрузок и условий окружающей среды.

Величину ресурса времени эксплуатации для силовых трансформаторов в настоящее время пытаются вычислять с помощью хорошо известного соотношения [2, 3]:

$$r = \frac{[1/DP_{\text{end}} - 1/DP(t)]}{A_0 \cdot 24 \cdot 365} e^{13350/(T+273)}, \quad (1)$$

которое представляет собой развернутое уравнение Аррениуса.

Здесь $[1/DP_{\text{end}} - 1/DP(t)]$ — запас прочности изоляционной конструкции; DP_{end} , $DP(t)$ — конечное и текущее значения степени полимеризации; $A_0 \exp(-13350/(T+273))$ — величина снижения запаса прочности в единицу времени; T — температура наиболее нагретой точки; A_0 — некоторая постоянная, значение которой существенно зависит от степени увлажнения твердой изоляции, величины кислотного числа масла и степени его чистоты.

Несмотря на кажущуюся простоту приведенного соотношения, его использование в практике обслуживания маслонаполненного оборудования вызывает большие трудности. Во-первых, соотношение (1) — многопараметрическое, число параметров в нем ничем не ограничено. Во-вторых, определение значений, даже основных параметров, весьма проблематично. Это связано с тем, что:

- наиболее нагретая зона изоляционной конструкции недоступна для прямого наблюдения и отбора проб, а методы определения температуры наиболее нагретой точки не отличаются достаточной точностью и надежностью;

- оценивание степени полимеризации твердой изоляции (DP) по величине вязкости весьма дорогостоящая процедура, не отличается высокой точностью и повторяемостью получаемых результатов;

- концентрации влаги и кислот в контролируемой области диэлектрической среды известны с большой степенью неопределенности, т. к. оцениваются расчетными методами с довольно большим уровнем приближения.

Аналогичными недостатками страдают и известные модели старения, представленные в виде уравнения теплового старения Монтзингера [4, 5]:

$$L(t_0, t + t_0) = (1/T) \int_{t_0}^{t_0+T} V[\theta(t)] dt, \quad (2)$$

где $V[\theta(t)] = \exp[(\theta - 98) \ln^2/\Delta]$; $\Delta = 6$ °C; $L(t_0, t + t_0)$ — величина средней скорости износа за указанный промежуток времени; T — период времени наблюдения.

Это же справедливо и в отношении обобщенного уравнения теплового старения, отличающегося от при-

веденного соотношения контролем не только температуры наиболее нагретой точки θ , но и степени увлажнения твердой изоляции, значений кислотного числа, концентрации кислорода и др. [4].

В этой связи обращают на себя внимание исследователей методы определения состояния изоляционной системы, основанные на измерении значений электрических параметров. Являясь по своей физической природе прямыми методами контроля, они позволяют поставить под надежный контроль значения параметров диэлектрической среды, которые характеризуют не только саму среду, но и процессы, протекающие в ней. Высокая чувствительность электрических параметров диэлектрических сред даже к незначительным нарушениям подтверждается проверенными на практике устойчивыми корреляционными соотношениями, раскрывающими функциональные связи между контролируемыми параметрами. Например, величине степени полимеризации твердой изоляции DP можно поставить в соответствие величину обобщенного индекса поляризации (tpi — total index polarization)

$$DP = 200tpi^{0.251},$$

степени увлажнения твердой изоляции трансформатора W — величину индекса поляризации PI

$$W = -4,8196 \lg PI + 3,2573.$$

Сюда же может быть отнесено и соотношение, устанавливающее корреляционную связь между величиной ресурса r , временем жизни $\tau_{ж}$ и tpi .

$$r = \tau_{ж} \{ (tpi/tpi_{\text{пред}})^{0.251} - 1 \}.$$

Как правило, такие соотношения хорошо работают в области ограниченных значений контролируемых величин и строго лимитированных условиях эксплуатации, отражая накопленный опыт предыдущих исследований [6 — 8].

Более значимым в данном случае является возможность сопоставления значений параметров диэлектрической среды, для которых отсутствуют методы непосредственного контроля (прямые методы измерения), значениям параметров, отличающихся надежными методами контроля или оценивания. Так, значениям DP , W , $\theta_{\text{гт}}$ можно поставить в соответствие tpi , PI , $R_{\text{из}}$ или некоторые их комбинации и, тем самым, перейти от свойств диэлектрической среды, определяющих ее возможности, к параметрам, характеризующим процессы, протекающим в работающей среде и определяющим ее устойчивость к действию эксплуатационных нагрузок. Именно эти параметры характеризуют надежность работы.

Расчет значений искомым параметров с помощью соотношений, аналогичных (1), не всегда может обеспечить требуемую точность и надежность получаемых результатов. Это связано с тем, что входящие в расчетные соотношения величины являются сложны-

ми функциями многочисленных параметров, часто неконтролируемых на опыте, к тому же диапазоны возможных значений ничем не ограничены.

В практической квалиметрии при оценке качества изделия используются не значения физических параметров, а соответствующие им единичные показатели, представляющие собой отношение контролируемой величины к некоторому ее предельному значению. В результате диапазон возможных значений влияющей величины укладывается, как правило, в пределах 0...1, а интенсивность функциональной зависимости учитывается величиной коэффициента значимости (весомости). В настоящее время существует несколько различных методов определения значений весовых коэффициентов [9, 10]. Наиболее эффективным является метод построения регрессионных соотношений, устанавливающих функциональную связь между искомым параметром и значениями параметров, находящихся под контролем. При этом объем исходной информации, отражающий опыт многочисленных исследований формализуемых закономерностей, должен быть достаточно большим.

Формирование комплексного показателя состояния изоляционного промежутка силового трансформатора

Состояние изоляционного промежутка (в нашем случае силового трансформатора) на практике воспринимается как уровень совершенства диэлектрической среды, степень надежности ее работы в сложных эксплуатационных условиях, функциональная пригодность (перечень и полнота выполняемых функций) и экономическая целесообразность изоляционной конструкции в целом. Количественные оценки состояния (весьма сложно воспринимаемого понятия) и представление его в виде некоторой физической величины, отличающейся надежным методом измерения или оценивания, предполагают формирование некоторого комплексного показателя: индекса здоровья *HI* (health index) или индекса старения — *AI* (aging index), единичные показатели которого несут вполне определенную информационную нагрузку. Выбор единичных показателей состояния диэлектрической среды и их количества не имеет в настоящее время четкой регламентации. Некоторые авторы полагают, что процессы старения твердой изоляции и условия эксплуатации оказываются при таких подходах определяющими [11]. Оптимальный путь, по их мнению, состоит в выделении совокупности единичных показателей, которые наиболее тесно связаны с процессами старения, их оптимизации с точки зрения значимости (весомости) и ранжированием. Представленная концепция индекса старения *AI* рассматривается как практический инструмент, позволяющий дать количественную оценку состояния диэлектрической среды, используя результаты не только лабораторных исследований, но и полевых

испытаний. При этом рассчитанный индекс старения включает в себя: значения электрических параметров диэлектрической среды, параметры контроля качества масла, оценку температуры наиболее нагретой точки контролируемой среды и др. В результате массив контролируемых параметров оказывается достаточно перегруженным и разноплановым. Оценка значимости (коэффициента весомости) теряет свою состоятельность, поскольку трудно обеспечить условие независимости единичных показателей.

Способность сохранять качество по современным представлениям характеризуется интенсивностью процессов, протекающих в изоляционной системе контролируемого изделия при его эксплуатации, атрибутом которых является реакция диэлектрической среды на действие эксплуатационных нагрузок, т. е. интенсивность диэлектрического отклика. Характер диэлектрического отклика изоляционной системы на действие внешних нагрузок и его интенсивность определяются степенью совершенства изоляционной системы, ее химическим составом, структурной однородностью диэлектрической среды, стабильностью межмолекулярного взаимодействия во времени. Параметры процессов, протекающих в диэлектрических средах под действием внешних нагрузок, отражая характерные особенности диэлектрического отклика, позволяют сформировать наши представления относительно устойчивости изоляционной системы во времени.

Эти представления, выраженные в виде регрессионных соотношений, устанавливают количественную взаимосвязь между параметрами контроля и показателями устойчивости диэлектрической среды (DP , W , θ , $r_{\text{остав}}$ и др.).

К параметрам контроля, с помощью которых регистрируют характер и интенсивность диэлектрического отклика, относят, прежде всего, параметры, определяющие развитие процессов поляризации во времени под действием приложенного электрического поля. Поляризация диэлектрика — это отклик диэлектрической системы на внешнее воздействие, а ее параметры чувствительны не только к малейшему нарушению структуры диэлектрической среды, но и характеру внешнего воздействия. Наиболее известными и часто применяемыми на практике при тестировании состояния изоляционных промежутков считаются [7]:

- t_{pi} (total index polarization) — обобщенный индекс поляризации;
- PI (index polarization) — индекс поляризации.
- R_{60} — сопротивление промежутка, измеренное спустя 60 с после приложения напряжения;
- DAR (dielectric absorption ratio) — коэффициент диэлектрической абсорбции;
- DD (dielectric discharge) — коэффициент диэлектрического разряда;
- C — емкость изоляционного промежутка;
- $I_{\text{ут}}$ — величина тока утечки при $t = 600$ с.

Данный перечень параметров может быть несколько расширен за счет включения в него значений R_{600} и $tg\delta$, измеренных при повышенных температурах.

Характерной особенностью представленного перечня параметров контроля является принадлежность каждого из них некоторой точке или отрезку кривой спада тока со временем для изоляционного промежутка, находящегося под контролем (рис. 1).

Особенно важно в таком случае, что каждая точка или отрезок кривой спада тока со временем может служить эффективным параметром контроля, число которых не имеет ограничений сверху. Независимость

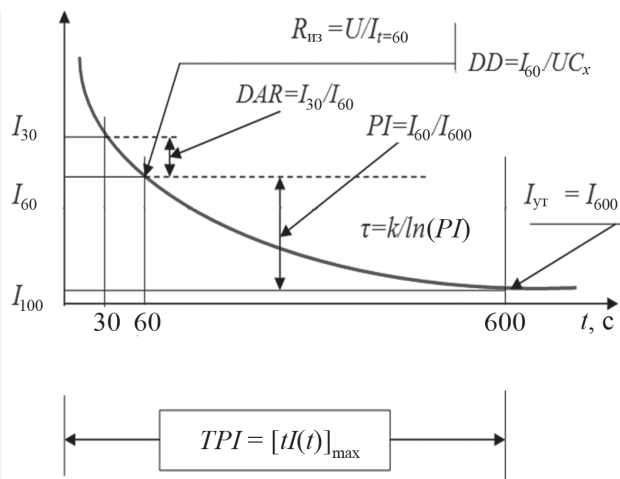
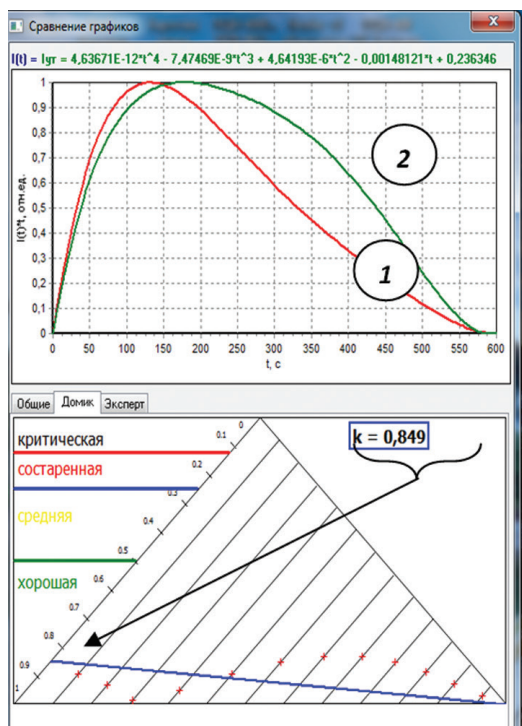


Рис. 1. Кривая спада тока со временем $I(t)$ и параметры контроля процесса поляризации

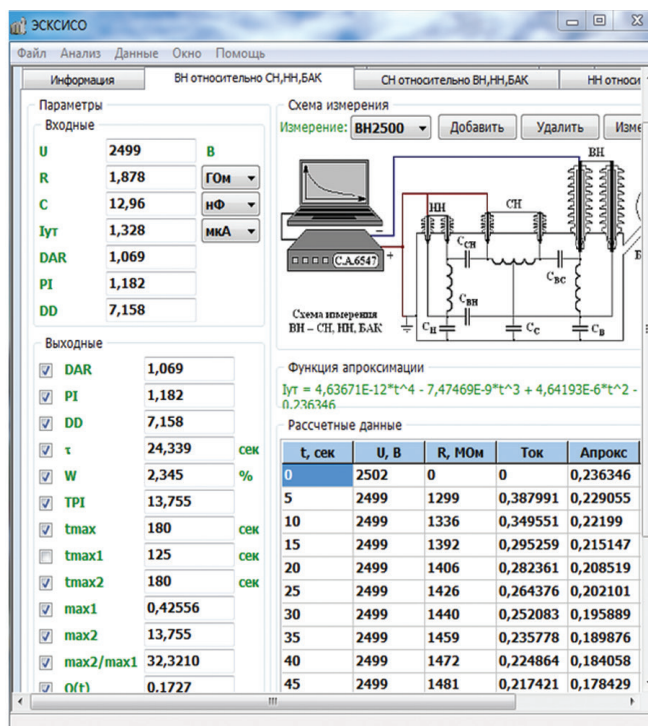
множества таких параметров контроля обеспечивается практически бесконечным числом видов поляризации, развивающихся в объеме исследуемого промежутка и определяющих характер и интенсивность спада тока со временем.

Таким образом, вычисление значения индекса старения AI как комплексного показателя качества диэлектрической среды, работающей в контролируемом изоляционном промежутке, сводится к численному сопоставлению кривой спада тока со временем в исследуемом промежутке с некоторой аналогичной кривой, взятой за аналог и принадлежащей изоляционному промежутку, качество которого не вызывает сомнения. Такой прием получил название метода назначенного лидера и хорошо зарекомендовал себя на практике при оценке состояния изоляционных промежутков силовых трансформаторов [12].

На рис. 2, а представлены виды спектров токов поляризации, реализующие кривые спада токов со временем, для промежутка, принятого в качестве аналога (1), и промежутка, находящегося под контролем (2). Особенностью представленных спектров токов поляризации является нормированность относительно их максимального значения, что позволяет контролировать степень деформированности формы кривой спада со временем, связанным с изменением химического состава диэлектрической среды (заметное увлажнение твердого диэлектрика или появление крупных конгломератов молекул, изменяющих природу процессов поляризации). Результат тако-



а



б

Рис. 2. Результаты сопоставления спектров токов поляризации (а) и перечень входных и выходных результатов контроля (б)

го сопоставления приведен на рис. 2 в виде значения $k = 0,849$ (промежуток — ВН-СН,НН; бак трансформатора — ТДНТ-63000/110; год выпуска — 1974; испытан в 2006 г.).

Чтобы вычислить величину индекса старения, необходимо значение $k = 0,849$ умножить на коэффициент, учитывающий изменение интенсивности структурной поляризации со временем $c_0 = (tpi/tpi_{(0)})^{0,251}$, тогда,

$$AI = k(tpi/tpi_{(0)})^{0,251},$$

где $tpi_{(0)}$ — значение tpi трансформатора, принятого за аналог.

Для трансформатора $tpi_{(0)} = 70$, $tpi = 13,755$ значение коэффициента состаренности $AI = 0,5643$.

Все вычисления, связанные с первичной обработкой данных, представление их в виде графических и регрессионных зависимостей, используемых для формирования экспертного заключения, выполняются с помощью информационно-экспертной системы ЭСКСИСО [13]. Совокупность входных и выходных данных, лежащих в основе формирования заключения о состоянии диэлектрической системы трансформатора, приведены на рис. 2, б.

Распределение Парето

Распределение Парето — удобная математическая модель (степенная функция), формализующая распределение непрерывных случайных величин, ограниченных снизу. Это, так называемые функции распределения с «тяжелыми хвостами». Распределения с «тяжелыми хвостами», к которым относится и распределение Парето, являются «...весьма полезным инструментом для исследования процессов, обусловленных многообразием форм в их единстве, когда могут присутствовать самые разные конфигурации и протекать различные временные процессы. Даже, если они носят спорадический и нерегулярный характер, то все равно они остаются частицами целого...» [14]. Именно такое многообразие форм четко выражено при старении диэлектрической среды, работающей в изоляционных промежутках силового трансформатора, под действием совокупности различных эксплуатационных нагрузок, поэтому соответствие поведение старения изоляционной системы трансформатора функции распределения вероятностей Парето является очевидным, что не может не привлекать внимание специалистов [15].

Под распределением Парето обычно понимается распределение, для которого отсутствуют значения X меньше некоторого порога X_{\min} , при этом условии выражения для плотности вероятностей $f(x)$ и функции распределения $F(x)$ принимают вид [16]:

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\alpha X_{\min}^{\alpha}}{X^{\alpha+1}} \end{array} \right\} \text{ при } X > X_{\min};$$

$$F(X) = 1 - \left(\frac{X_{\min}}{X} \right)^{\alpha} \text{ для } \forall X \geq X_{\min}.$$

Приведенные соотношения показывают, что распределение Парето, являясь двухпараметрическим (X_{\min} , α), зависит в основном от одного параметра α , задающего его форму (интенсивность спада кривой распределения со временем). Считается, что величина α должна быть определена с достаточной достоверностью из имеющихся экспериментальных данных, характеризующих поведение контролируемого процесса во времени. Так, в [15] была сделана успешная попытка использовать распределение Парето для моделирования процесса старения изоляционной системы силового трансформатора, используя для этого кривую спада степени полимеризации $DP(t)$ со временем, представленную в виде соотношения

$$\frac{DP(t)}{dt} = -k(t)[DP(t)]^2,$$

из которого следует

$$\frac{DP(t)}{DP(t_0)} = 1 / (1 + DP(t_0) \int_{t_0}^t k(t) dt), \quad (3)$$

где $k(t) = A \exp(-E/kT(t))$, E — энергия активации, эВ; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Соотношение (3) позволяет оценить степень изношенности диэлектрической среды к моменту времени t и характеризует устойчивость изоляционной системы к действию эксплуатационных нагрузок. По своей физической природе оно является эквивалентом значения α в Парето-распределении, определяющего его форму. Однако следует иметь в виду, что параметр DP хотя и обладает в некоторой степени свойствами общности, не является таковым, т. е. не обладает в полной мере свойствами общности и комплексности. Кроме того, существующие методы измерения величины DP (уравнение Марка-Хувенка $\eta = 4,6 \cdot 10^{-4} M_{\text{cp}}^{0,73}$, где η — вязкость раствора исследуемого полимера, средневзвешенный молекулярный вес которого $M_{\text{cp}} = f(\eta)$) не отличаются высокой точностью и стабильностью получаемых результатов. В этом смысле более физически обоснованным является использование индекса старения AI , значения которого лежат в пределах от 0 до 1. Значение $AI = 1$ соответствует степени изношенности диэлектрической среды, равной нулю, кривая распределения Парето приближается к своему идеальному виду. При $AI = 0$ вероятность появления значений случайной величины равна нулю, т. е. такого значения случайной величины не существует.

Оценка величины оставшегося ресурса времени. Результаты, анализ

Для иллюстрации возможностей предлагаемых подходов к оценке величины ресурса времени воспользуемся вычисленным значением индекса старения $AI = 0,5643$ для изоляционного промежутка ВН–СН, НН, бак трансформатора, результаты испытания которого представлены на рис. 2. Параметры Парето-распределения в этом случае принимают следующие значения: $X_{min} = 32$ г.; $\alpha = AI = 0,5643$. Функция плотности вероятностей может быть представлена следующим образом:

$$f(X) = \frac{0,5643(X_{min})^{0,5643}}{(X)^{1,5643}},$$

а область существования значений случайной величины укладывается в пределах 30...70 лет.

Варьирование параметров Парето-распределения позволяет исследовать диагностические возможности и обеспечить требуемую точность оценивания величины ресурса времени жизни контролируемого изоляционного промежутка трансформатора. Поэтому для исследования поведения Парето-распределения был выбран ряд возможных значений $X_{min} = \{15; 32; 45\}$ лет и для $\alpha = AI = \{0,25; 0,5643; 1,0\}$. Крайне значения играют роль граничных, определяя, тем самым, область возможных состояний исследуемой диэлектрической среды. Значения $\{X_{min}; \alpha\} = \{32; 0,5643\}$ характеризуют состояние изоляционного промежутка ВН–СН, НН, бак трансформатора, находящегося под контролем, и определяют величину оставшегося времени эксплуатации. Полученные результаты представлены на рис. 3 и в таблице.

Парето-распределение при $X_{min} = 15$ лет и $\alpha = \{0,25; 0,5643; 1,0\}$ дано на рис. 3, а. Изображенное

Результаты вычисления величины оставшегося ресурса времени

$X_{min}, \text{ г.}$	$r_{ост}, \text{ Г.}$		
	$\alpha = 0,25$	$\alpha = 0,5643$	$\alpha = 1,0$
15	8	20	24
32	0	14	25
45	0	7	12

распределение, представленное нижним рядом точек, принадлежит изоляционному промежутку, изношенному до предельно допустимого уровня ($DP = 200$ стр. ед.). При $f(X) = 0,01$ значение оставшегося ресурса времени эксплуатации составляет не более 8 лет (7,57 лет).

Изоляционный промежуток при таких значениях параметров функции распределения не обеспечит запланированный срок эксплуатации трансформатора (25 лет). Если изоляционному промежутку соответствует Парето-распределение с параметрами $\{15 \text{ лет}; 0,5643\}$ (средний ряд точек рис. 3, а) при степени полимеризации $DP = 400...500$ стр. ед., то величина ресурса времени равна $r_{ост} = 20$ лет (таблица). Полный срок жизни — 35 лет.

Оставшийся ряд точек (см. рис. 3, а) показывает Парето-распределение с параметрами $\{15 \text{ лет}; 1,0\}$ (верхний ряд точек) при $DP = 800...900$ стр. ед. Величина ресурса времени дальнейшей эксплуатации — 24 г. при полном сроке эксплуатации 39 лет.

Приведенные результаты показывают, что такой набор параметров реализовать практически невозможно. Чтобы состарить работающий трансформатор на 75 % за 15 лет, условия эксплуатации должны быть недопустимо тяжелыми и мгновенно исключаются на практике существующей системой защит.

С точки зрения практики обслуживания маслонаполненного оборудования представляется более ин-

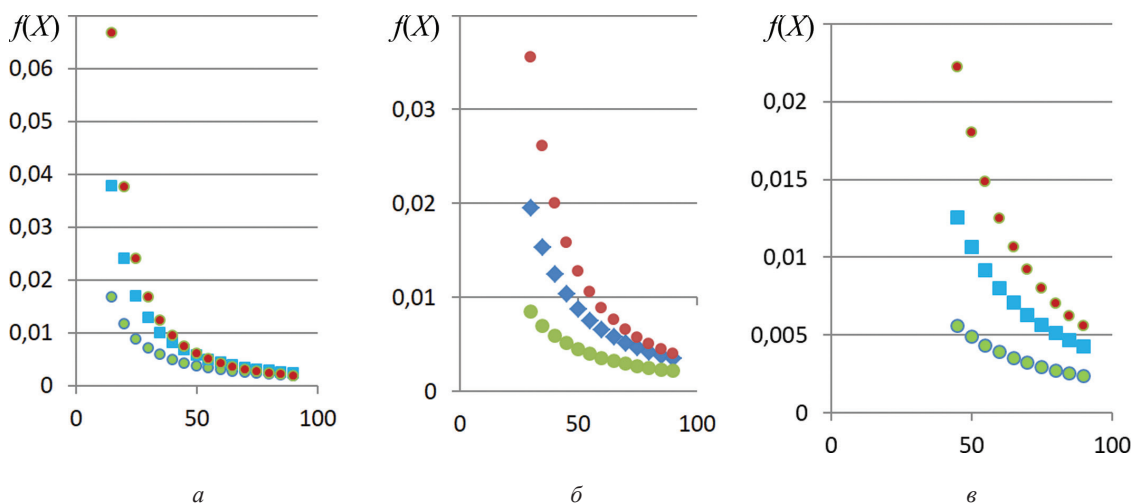


Рис. 3. Вид функции распределения Парето при различных параметрах $\alpha = 0,25$ (нижний ряд); $0,5643$ (средний ряд); $1,0$ (верхний ряд точек); время эксплуатации (в годах) $X_{min} = 15$ (а); 32 (б); 45 (в)

тересным распределение Парето, параметры которого имеют значения $X_{\min} = 32$ г. и $\alpha = \{0,25; 0,5643; 1,0\}$, рис. 3, б. Во-первых, возраст трансформатора (32 г.) наиболее распространенный среди эксплуатируемого парка трансформаторов. Во-вторых, уровень оставшегося запаса ресурса времени (0,5643) является более реалистичным.

Распределение Парето с параметрами $\{32$ г.; $0,25\}$ лежит в области $f(X) \leq 0,01$ (см. рис. 3, б). Это свидетельствует о том, что при таких параметрах изоляционной системы устойчивую работу трансформатора обеспечить невозможно. Величина оставшегося ресурса времени равна нулю.

Для распределения Парето с параметрами $\{32$ г.; $0,5643\}$ (см. рис. 3, б) значительная часть кривой располагается в области $f(X) \geq 0,01$, демонстрируя возможность устойчивой работы изоляционного промежутка в течение 14 лет (таблица). Полный срок работы при этом составляет 46 лет. Величина ресурса времени эксплуатации, рассчитанная по экспериментально полученному значению $t_{pi} = 13,755$ для этого же промежутка, оказалась равной 14,9 лет. Хорошее совпадение результатов оценивания значения оставшегося ресурса времени различными методами подтверждает диагностические возможности метода, в основе которого лежит распределение Парето.

Для изоляционной системы с параметрами $\{32$ г.; $1,0\}$ величина ресурса времени, рассчитанная с помощью распределения Парето, составляет $r_{\text{ост}} = 24,54 \approx 25$ лет при полном сроке жизни в 57 лет. Полученные оценки, демонстрируя предельные возможности работающей системы, представляют в большей степени теоретический интерес, так как трансформатор, проработавший 32 г., не может иметь степень износа диэлектрической среды равной нулю.

Не менее интересными представляются и результаты оценки величины оставшегося ресурса времени для состаренной в значительной степени изоляционной системы с параметрами $X_{\min} = 45$ лет и $\alpha = \{0,25; 0,5643; 1,0\}$.

Для состояний: $\{45$ лет; $0,25\} \rightarrow r_{\text{ост}} = 0$ лет; $\{45$ лет; $0,5643\} \rightarrow r_{\text{ост}} = 7$ лет; $\{45$ лет; $1,0\} \rightarrow r_{\text{ост}} = 12$ лет. Предельный срок службы составляет 57 лет.

Следует отметить, что в данном случае на величину $r_{\text{ост}}$ оказывает влияние в основном величина области возможных значений $\tau_{\text{ж}}$.

Заключение

Рассмотренные подходы для определения величины оставшегося ресурса времени эксплуатации изоляционных промежутков маслонаполненного оборудования с помощью распределения Парето достаточно эффективны, так как параметрами данного распределения являются параметры диэлектрической среды $\tau_{\text{ж}}$, $AI = \alpha$, определяющие ее состояние.

Использование распределения Парето позволяет получить обширную информацию, необходимую для разработки алгоритма управления временем жизни изоляционной системы силового трансформатора.

Рассмотренные подходы существенным образом расширяют инструментарий контроля состояния работающей диэлектрической среды и, особенно, методов исследования спектров тока диэлектрической абсорбции, позволяющих оценить степень полимеризации DP , увлажненность W , степень состаренности AI , величину ресурса времени эксплуатации $\tau_{\text{ж}}$ и др.

Литература

1. **Алексеев Б.А.** Продление срока службы изоляции силовых трансформаторов // Электро. 2004. № 3. С. 25—29.
2. **Васин В.П., Долин А.П.** Оценка выработанного ресурса изоляции маслонаполненных трансформаторов // Электро. 2009. № 2. С. 37—41.
3. **Осотов В.Н.** Практические аспекты оценки фактического срока службы силовых трансформаторов // Контроль технического состояния оборудования объектов энергетики: III науч.-практ. конф. М., 2016.
4. **Долин А.П., Кизляковский А.М.** К вопросу оценки остаточного ресурса силовых трансформаторов на основе комплексного диагностического обследования // Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем: Труды II Всерос. науч.-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. С. 40—43.
5. **Василевский В.В., Долин А.П.** Оценка расхода ресурса бумажной изоляции силового маслонаполненного трансформатора с помощью уточненной формулы интеграла старения // Электротехника и электромеханика. 2015. № 1. С. 16—19.
6. **Зенова Е.В.** Разработка и исследование методов диагностики изоляционной системы маслонаполненных трансформаторов на основе изучения спектров токов поляризации: автореферат дисс. ... доктора техн. наук. М.: ВНИИ КП, 2013.
7. **Зенова Е.В., Чернышев В.А., Чернов В.А.** Спектры токов поляризации изоляционных промежутков маслонаполненного оборудования и их диагностические возможности // Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем: Труды II Всерос. науч.-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. С. 60—62.
8. **Пат. № 2491561 РФ.** Способ определения состояния и ресурса изоляционной системы электрооборудования / В.А. Чернышев и др. // Бюл. изобрет. 2013. № 24.
9. **Рыжаков В.В., Моисеев В.Б., Пятирублевый В.Г.** Основы оценивания качества продукции. Пенза: Изд-во Пензенского техн. ун-та, 2001.
10. **Ферапонтов А.И.** Математическая модель расчета коэффициентов весомости показателей качества по результатам экспериментальных оценок // Стандарты и качество. 1996. № 4. С. 34.
11. **Yuan Li e. a.** Aging Assessment of Power Transformer Using Multy-parameter // Intern. J. Electrical and Informatics. 2013. V. 5. No. 1. Pp. 34—44.

12. **Чернышев В.А. и др.** Диагностическая система ЭСКСИСО, предназначенная для оценки состояния изоляционной системы маслонеполненного оборудования // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18. № 4. С. 729—739.

13. **Свидетельство** о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015610955. Информационно-экспертная система ЭСКСИСО / М.А. Кисляков, В.А. Чернов, В.А. Чернышев. 2015.

14. **Василенко С.Л.** Случайность и «золотая» пропорция в системе «хаос-порядок». М.: Академия тринитаризма, 2009.

15. **Alireza Esmailinasbi, Behrooz Vahidi.** Prediction of Power Transformer Insulation Length of Life Using Thermal Model and Pareto Distribution // Sci. Int. (Lahore). 2014. V. 26 (5). Pp. 1953—1957.

16. **Чернявский Д.С., Никитин А.П., Чернявская О.Д.** О возникновении распределения Парето в нелинейных динамических системах // Биофизика. 2008. Т. 53. № 1. С. 351—358.

References

1. **Alekseev B.A.** Prodlenie Sroka Sluzhby Izolyatsii Silovykh Transformatorov. Elektro. 2004;3:25—29. (in Russian).

2. **Vasin V.P., Dolin A.P.** Otsenka Vyrabotannogo Resursa Izolyatsii Maslonapolnennykh Transformatorov. Elektro. 2009;2:37—41. (in Russian).

3. **Osov V.N.** Prakticheskie Aspekty Otsenki Fakticheskogo Sroka Sluzhby Silovykh Transformatorov. Kontrol' Tekhnicheskogo Sostoyaniya Oborudovaniya Ob'ektov Energetiki: III Nauch.-prakt. Konf. M., 2016. (in Russian).

4. **Dolin A.P., Kizlyakovskiy A.M.** K Voprosu Otsenki Ostatochnogo Resursa Silovykh Transformatorov na Osnove Kompleksnogo Diagnosticheskogo Obsledovaniya. Povyshenie Nadezhnosti i Effektivnosti Ekspluatatsii Elektricheskikh Stantsiy i Energeticheskikh Sistem: Trudy II Vseros. Nauch.-prakt. Konf. M.: Izdatel'skiy Dom MPEI, 2012:40—43. (in Russian).

5. **Vasilevskiy V.V., Dolin A.P.** Otsenka Raskho-da Resursa Bumazhnoy Izolyatsii Silovogo Maslonapolnennogo Transformatora s Pomoshch'yu Utochnennoy Formuly Integrala Stareniya. Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2015;1:16—19. (in Russian).

6. **Zenova E.V.** Razrabotka i Issledovanie Metodov Diagnostiki Izolyatsionnoy Sistemy Maslonapolnennykh Transformatorov na Osnove Izucheniya Spektrov Tokov Polyarizatsii: Avtoreferat Diss. ... Doktora Tekhn. Nauk. M.: VNIIPK, 2013. (in Russian).

7. **Zenova E.V., Chernyshev V.A., Chernov V.A.** Spektry Tokov Polyarizatsii Izolyatsionnykh Promezhutkov Maslonapolnennogo Oborudovaniya i ih Diagnosticheskie Vozmozhnosti. Povyshenie Nadezhnosti i Effektivnosti Ekspluatatsii Elektricheskikh Stantsiy i Energeticheskikh Sistem: Trudy II Vseross. Nauch.-prakt. Konf. M.: Izdatel'skiy Dom MPEI, 2012:60—62. (in Russian).

8. **Pat. 2491561 RF.** Sposob Opredeleniya Sostoyaniya i Resursa Izolyatsionnoy Sistemy Elektrooborudovaniya / V.A. Chernyshev i dr. Byul. Izobret. 2013;24. (in Russian).

9. **Ryzhakov V.V., Moiseev V.B., Pyatirublevyy V.G.** Osnovy Otsenivaniya Kachestva Produktsii. Penza: Izd.-vo Penzenskogo Tekhn. Un-ta, 2001. (in Russian).

10. **Ferapontov A.I.** Matematicheskaya Model' Rascheta Koeffitsientov Vesomosti Pokazateley Kachestva po Rezul'tatam Eksperimental'nykh Otsenok. Standarty i Kachestvo. 1996;4:34. (in Russian).

11. **Yuan Li e. a.** Aging Assessment of Power Transformer Using Multy-parameter. Intern. J. Electrical and Informatics. 2013;5;1:34—44.

12. **Chernyshev V.A. i dr.** Diagnosticheskaya Sistema ESKSISO, Prednaznachennaya dlya Otsenki Sostoyaniya Izolyatsionnoy Sistemy Maslonapolnennogo Oborudovaniya. Vestnik MGTU. 2015;18;4:729—739. (in Russian).

13. **Svidetel'stvo** o Gos. Registratsii Programmy dlya EVM № 2015610955. Informatsionno-ekspertnaya sistema ESKSISO / M.A. Kislyakov, V.A. Chernov, V.A. Chernyshev. 2015. (in Russian).

14. **Vasilenko S.L.** Sluchaynost' i «Zolotaya» Proportsiya v Sisteme «Haos-poryadok». M.: Akademiya Trinitarizma, 2009. (in Russian).

15. **Alireza Esmailinasbi, Behrooz Vahidi.** Prediction of Power Transformer Insulation Length of Life Using Thermal Model and Pareto Distribution. Sci. Int. (Lahore). 2014;26 (5):1953—1957.

16. **Chernyavskiy D.S., Nikitin A.P., Chernyavskaya O.D.** O Vozniknovenii Raspredeleniya Pareto v Nelineynykh Dinamicheskikh Sistemah. Biofizika. 2008; 53;1:351—358. (in Russian).

Сведения об авторах

Чернышев Валентин Александрович — доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники Смоленского филиала НИУ «МЭИ», e-mail: v.a.chern@mail.ru

Зенова Елена Валентиновна — доктор технических наук, профессор кафедры нанотехнологии микроэлектроники НИУ «МЭИ», начальник отдела разработки и исследований микро- и наносистем института нанотехнологий микроэлектроники РАН, e-mail: elena_zenova@mail.ru

Information about authors

Chernyshev Valentin A. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: v.a.chern@mail.ru

Zenova Elena V. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Nanotechnology of Microelectronics Dept., NRU MPEI, Head of the Development and Research of Micro- and Nanosystems Dept., Institute of Nanotechnology Microelectronics RAS, e-mail: elena_zenova@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.05.2017